



Munich Personal RePEc Archive

Estimating Gravity Models of International Trade: A Survey

Shumilov, Andrei

CEMI RAS

2016

Online at <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/75371/>
MPRA Paper No. 75371, posted 01 Dec 2016 20:15 UTC

Особенности оценивания гравитационных моделей международной торговли

А.В. Шумилов

Аннотация: В данной работе представлен обзор методологии эконометрического оценивания гравитационных моделей международной торговли, инструментарий которой значительно обогатился в последние десятилетия вследствие появления теоретически обоснованных модификаций гравитационного уравнения. Рассматриваются методики учета структурных показателей многостороннего сопротивления торговле в спецификациях на пространственных и панельных данных. Анализируются распространенные ошибки гравитационного моделирования, связанные с не соответствующим теории расчетом переменных двусторонней торговли и экономического размера. Обсуждаются способы состоятельного оценивания гравитационных моделей в условиях гетероскедастичности ошибок и наличия нулевых наблюдений в данных о торговых потоках. Приведен обзор оценок коэффициентов при важнейших детерминантах международной торговли, полученных в различных исследованиях.

Ключевые слова: гравитационные модели международной торговли; торговые издержки; многостороннее сопротивление торговле; эконометрические методы.

Классификация JEL: C1, F1, F14.

Estimating Gravity Models of International Trade: A Survey

Andrei Shumilov

Abstract: This paper surveys the gravity models of trade estimation methodology, which has been substantially enriched in recent decades due to the emergence of theoretically founded modifications of the gravity equation. Alternative techniques to account for structural multilateral resistance terms in specifications both on cross-section and panel data are examined. Common errors in gravity modeling associated with atheoretical calculations of bilateral trade and economic size variables are analyzed. Ways to consistently estimate gravity models under heteroscedastic errors and in the presence of zero trade flows are discussed. An overview of coefficient estimates for the most important international trade factors obtained in different applications is given.

Keywords: gravity models of trade; trade costs; multilateral resistance; econometric estimators.

JEL classification: C1, F1, F14.

Содержание

1. Введение	3
2. Проблема пропущенных переменных в традиционной модели	6
3. Способы учета показателей многостороннего сопротивления	7
3.1. Использование индексов отдаленности страны от всех остальных торговых партнеров	7
3.2. Использование индексов цен официальной статистики	9
3.3. Методология Андерсона и ван Винкоопа	10
3.4. Методология Байера и Бергстрана	12
3.5. Фиктивные переменные экспортера и импортера (пространственные данные)	13
4. Особенности оценивания гравитационного уравнения на панельных данных	15
Фиксированные эффекты импортера и экспортера плюс годовые фиктивные переменные; фиксированные эффекты импортера и экспортера, меняющиеся во времени; классическая модель с фиксированными эффектами; модель со случайными эффектами, модель Хаусмана-Тейлора.	
5. Некоторые типичные ошибки эмпирического гравитационного моделирования	18
Неправильное усреднение данных по торговле (ошибка измерения зависимой переменной); использование реальных ВВП в качестве мер размера торговых партнеров (ошибка измерения независимой переменной).	
6. Проблема гетероскедастичности	21
7. Проблема нулевых наблюдений	24
8. Обзор оценок коэффициентов гравитационных моделей, полученных в разных работах ..	27
9. Заключение	29
Список литературы	31
Приложение 1. Модель Андерсона и ван Винкоопа	35

1. Введение

Гравитационные модели торговли являются одним из важнейших средств анализа международных и межрегиональных торговых потоков. Исходной точкой для появления таких моделей послужила аналогия с Законом всемирного тяготения Ньютона, который гласит, что сила гравитационного притяжения F между двумя физическими телами прямо пропорциональна массам этих тел, m_1 и m_2 , и обратно пропорциональна квадрату расстояния d между ними:

$$F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2}, \quad (1)$$

где G – гравитационная константа. Взяв уравнение (1) за основу, Ян Тинберген, физик по образованию и будущий нобелевский лауреат по экономике, постулировал существование связи между стоимостным объемом экспорта из страны i в страну j (x_{ij}), экономическими размерами экспортера и импортера (y_i и y_j) и издержками торговли между странами (t_{ij}) вида:

$$x_{ij} = k \cdot \frac{y_i^\alpha \cdot y_j^\beta}{t_{ij}^\gamma}, \quad (2)$$

где $\alpha > 0$, $\beta > 0$, $\gamma > 0$ (Tinbergen, 1962). Эта зависимость получила название гравитационного уравнения международной торговли.

В своей оригинальной работе Тинберген оценил модель (2) в логарифмической форме методом наименьших квадратов, используя в качестве меры экономического размера ВВП страны, в качестве мер издержек торговли – расстояние между странами, фиктивные переменные наличия общей границы и членства в торговых союзах. Современные исследователи как альтернативные меры экономического размера также используют численность населения, площадь страны, ВВП на душу населения, а к детерминантам торговых издержек относят следующие факторы (они систематизированы в работах Anderson, van Wincoop, 2004, и Baxter, Kouparitsas, 2006):

- Таможенные тарифы;
- Транспортные издержки;
- Членство в валютных союзах, волатильность обменного курса;
- Политические союзы, военные блоки;
- Языковые барьеры, колониальные связи, общая религия;
- Информационные барьеры;
- Контрактные издержки;
- Географические переменные: островное государство, нет доступа к морю.

Прикладные исследования, использующие гравитационную модель, соответственно, посвящены изучению влияния каких-либо из вышеперечисленных детерминант торговых издержек на международную торговлю.

Эмпирически гравитационное уравнение представляет собой одну из самых устойчивых взаимосвязей, наблюдаемых в мировой экономике. В приложениях оценки коэффициентов при переменных экономического размера регионов обычно близки к 1, а оценки коэффициентов при

переменной расстояния колеблются в районе –1. Кроме того, гравитационные спецификации обычно обладают высокой объясняющей силой – во многих исследованиях коэффициент детерминации R^2 попадает в диапазон от 0.8 до 0.9. Однако, несмотря на свою способность хорошо описывать данные, гравитационные модели торговли долгое время критиковались за отсутствие теоретической основы и механический перенос закона всемирного тяготения из физики в экономику.

Первой успешной попыткой вывести гравитационное уравнение международной торговли на базе микроэкономической теории стала работа Anderson (1979). В ее модели общего равновесия ключевым являлось предположение Армингтона о том, что однотипные товары, различающиеся местом производства, несовершененно заменяемы для предъявляющих на них спрос агентов (их предпочтения обычно задаются функцией полезности с постоянной эластичностью замещения, CES¹). Усовершенствованные варианты модели Андерсона были предложены в работах Bergstrand (1985) и Anderson, van Wincoop (2003). Гравитационное уравнение Андерсона и ван Винкоопа заслуживает здесь особого упоминания, поскольку авторы смогли представить его в простом и элегантном виде, ставшим уже каноническим²:

$$x_{ij} = \frac{y_i \cdot y_j}{y^T} \left(\frac{t_{ij}}{\Pi_i \cdot P_j} \right)^{1-\sigma}, \quad (3)$$

где y_i, y_j, y^T – ВВП экспортера, импортера и мировой экономики соответственно, σ – эластичность замещения между товарами разных стран ($\sigma > 1$), P_j – CES-индекс потребительских цен в стране j , и

$$\Pi_i = \left(\sum_j (t_{ij} / P_i)^{1-\sigma} \theta_j \right)^{1/(1-\sigma)}, \quad (4)$$

где θ_j – доля страны j в мировом ВВП. Поскольку в Π_i и P_j агрегируются все *двусторонние* торговые барьеры, с которыми сталкиваются экспортер и импортер соответственно, эти величины получили название показателей *многостороннего сопротивления торговле*: Π_i – сопротивляемость экспорту из региона i , P_j – сопротивляемостью импорту в регион j . Из уравнения (3), таким образом, следует, что объем торговли между регионами i и j отрицательно зависит не просто от величины двустороннего торгового барьера t_{ij} (как в (2)), а от t_{ij} в сравнении с многосторонним сопротивлением торговле экспортера и импортера. Интуитивно данная взаимосвязь объясняется крайне просто: чем более затруднена торговля регионов i и j с другими регионами, тем больше стимулов создается для взаимной торговли i и j .

В дальнейшем выяснилось, что зависимость гравитационного типа можно вывести, исходя из предпосылок любой из наиболее известных теорий международной торговли. – классической модели Хекшера-Олина, в которой торговля возникает вследствие отличий между странами в на-

¹ Constant elasticity of substitution.

² Вывод этого уравнения приведен в Приложении 1. Отметим, что случай единственного товара, производимого регионом, рассматривается авторами лишь для простоты изложения. Если регион производит несколько товаров, то итоговое гравитационное уравнение для экспорта отдельного товара будет иметь аналогичный вид (см., например, Anderson, van Wincoop, 2004).

деленности факторами производства (Deardorff, 1998); рикардианской модели, где определяющую роль играют отличия в технологии производства между странами (Eaton, Kortum, 2002); новой теории международной торговли (Krugman, 1980; Helpman, Krugman, 1985; Bergstrand, 1989) (предположения: монополистическая конкуренция среди производителей и склонность к продуктовому разнообразию потребителей); новейшей теории торговли, где различия в производительности фирм позволяют выделить экстенсивную и интенсивную составляющие экспорта и объяснить игнорируемый ранее феномен нулевых торговых потоков (Chaney, 2008; Helpman et al., 2008). Несмотря на разные начальные предположения (и разную интерпретацию параметров), гравитационные уравнения вышеуказанных работ объединяет то, что все они могут быть приведены к виду (3).

Несовпадение теоретически обоснованной гравитационной модели (3) с “традиционной” (2) послужило толчком к разработке целого ряда альтернативных методик эмпирического оценивания гравитационных спецификаций, корректно учитывающих показатели многостороннего сопротивления (Anderson, van Wincoop, 2003; Baier, Bergstrand, 2009, и др.). Использование этих методик в приложениях серьезно улучшило качество поручаемых оценок детерминант двусторонней торговли, а в некоторых случаях даже привело к пересмотру более ранних эмпирических результатов (например, “парадокса государственной границы”, означающего многократное превышение объема торговли между двумя регионами одной и той же страны над объемом торговли между двумя регионами разных стран³). В дальнейшем были усовершенствованы также методики оценивания гравитационных спецификаций, учитывающие их специфические статистические особенности (такие как гетероскедастичность ошибок в мультипликативной форме модели, значительное количество нулевых наблюдений в данных по внешней торговле: Eaton, Cortum, 2001; Santos Silva, Tenreyro, 2006, и др.). Обзору значительно обогатившейся в последние десятилетия методологии эмпирического оценивания гравитационных моделей торговли и посвящена настоящая работа. Последовательность изложения материала в ней такова. В Разделе 2 обсуждается проблема смещенности оценок коэффициентов “традиционной” гравитационной модели вследствие игнорирования показателей многостороннего сопротивления торговле. Методики учета этих показателей в эмпирических исследованиях рассматриваются в Разделе 3, особенности оценивания панельных спецификаций – в Разделе 4. Распространенные ошибки эмпирического гравитационного моделирования, связанные с не соответствующим теории расчетом переменных двусторонней торговли и экономического размера, анализируются в Разделе 5. Далее обсуждаются способы состоятельного оценивания гравитационных моделей в условиях гетероскедастичности ошибок (Раздел 6) и наличия нулевых наблюдений в данных о торговых потоках (Раздел 7). В Разделе 8 приведен обзор

³ Этот неожиданный результат впервые был получен в работе McCallum (1995), посвященной изучению влияния барьера национальной границы на торговлю провинций Канады и штатов США между собой в 1998 г. Из оценивания традиционной гравитационной модели следовало, что при прочих равных торговля между двумя провинциями Канады должна в 22 раза превышать торговлю между провинцией и штатом США. Андерсон и Ван Винкооп (Anderson, van Wincoop, 2003), включив в гравитационную модель многостороннее сопротивление, показали, что эффект границы для провинций Канады в работе Маккаллума завышен более чем в 2 раза.

оценок коэффициентов при важнейших детерминантах международной торговли, полученных в различных исследованиях.

2. Проблема пропущенных переменных в традиционной модели

Важнейшее отличие теоретически обоснованной гравитационной модели от “традиционной” состоит в том, что в ней присутствуют напрямую не наблюдаемые показатели многостороннего сопротивления экспортера и импортера. Игнорирование этих величин ведет к смещенности оценок коэффициентов модели. Поясним возникающую проблему более подробно.

Теоретически обоснованная эмпирическая гравитационная модель в логарифмически-линеаризованной форме имеет вид:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \dots + \beta_K \cdot x_K + \gamma \cdot q + v, \quad (5)$$

где наблюдаемые величины x_1, x_2, \dots, x_K – меры экономического размера и составляющие двусторонних торговых издержек, ненаблюдаемый фактор q отвечает за показатели многостороннего сопротивления Π_i и P_j и, возможно, за некоторые пропущенные детерминанты двусторонних издержек, а v – вектор ошибок: $E(v | X, q) = 0$.

Исследователи, игнорирующие наличие ненаблюдаемых величин, фактически оценивают гравитационную модель вида:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \dots + \beta_K \cdot x_K + u, \quad (6)$$

где ошибка u складывается из двух составляющих: $u = \gamma \cdot q + v$. Согласно предположениям модели (5), компонента v здесь имеет нулевое среднее и не коррелирована с переменными x (и q). Поскольку константа входит в число регрессоров, можно также считать, что $E(q) = 0$. Тогда, соответственно, будет выполняться равенство: $E(u) = 0$. При этом ошибка u будет не коррелирована с x_j тогда и только тогда, когда величина q не коррелирована с регрессорами. Но, как известно, ненаблюдаемые показатели многостороннего сопротивления торговле функционально зависят от детерминант двусторонних торговых барьеров (см. (4)). Поэтому в нашем случае q (а, следовательно, и u) коррелирована с регрессорами. Соответственно, мы получаем проблему эндогенности, и МНК-оценки коэффициентов β_j в уравнении (6) будут смещенными и несостоятельными.

Нетрудно вывести формулу для асимптотического смещения оценок, возникающего вследствие игнорирования пропущенных переменных (Wooldridge, 2002). Запишем выражение для линейной проекции величины q на наблюдаемые объясняющие переменные:

$$q = \delta_0 + \delta_1 \cdot x_1 + \dots + \delta_K \cdot x_K + r, \quad (7)$$

где по определению такой проекции $E(r) = 0$, $Cov(x_j, r) = 0$, $j = 1, 2, \dots, K$. Подставив (7) в (6), после несложных преобразований получим:

$$y = (\beta_0 + \gamma \cdot \delta_0) + (\beta_1 + \gamma \cdot \delta_1) \cdot x_1 + \dots + (\beta_K + \gamma \cdot \delta_K) \cdot x_K + v + \gamma \cdot r.$$

Так как $(v + \gamma \cdot r)$ имеет нулевое среднее и не коррелирует с регрессорами, отсюда следует, что:

$$\text{plim}\hat{\beta}_j = \beta_j + \gamma \cdot \delta_j,$$

т.е. смещение оценки $\hat{\beta}_j$ равно $\gamma \cdot \delta_j$. Часто, когда исследователей интересуют свойства оценки коэффициента при каком-то конкретном регрессоре, делается упрощающее предположение, что величина q не коррелирована со всеми остальными регрессорами (т.е. $\delta_i = 0$ для всех $i \neq j$). В этом случае $\delta_j = \text{Cov}(x_j, q) / V(x_j)$, и

$$\text{plim}\hat{\beta}_j = \beta_j + \gamma \cdot \text{Cov}(x_j, q) / V(x_j).$$

С помощью этой формулы нетрудно определить направление и величину смещения получаемой оценки. Так, если ненаблюдаемая пропущенная переменная q в гравитационной модели положительно влияет на объем торговли (т.е. если $\gamma > 0$) и положительно коррелирует с рассматриваемым регрессором x_j ($\text{Cov}(x_j, q) > 0$), то оценка коэффициента при x_j в уравнении (6) будет завышена.

3. Способы учета показателей многостороннего сопротивления

Существует множество способов решения проблемы пропущенных переменных, возникающей вследствие игнорирования показателей многостороннего сопротивления в гравитационной модели. Далее в настоящем разделе мы последовательно разберем наиболее известные из таких методик: использование индексов отдаленности, ценовых индексов официальной статистики, методики Андерсона и ван Винкоопа и Байера и Бергстрана, фиксированные эффекты экспортера и импортера.

3.1. Использование индексов отдаленности страны от всех остальных торговых партнеров

Необходимость учета не только двусторонних, но многосторонних (в смысле расстояния) торговых барьеров в эмпирическом гравитационном моделировании, признавалась исследователями еще до появления теоретических обоснований гравитационного уравнения. В данном контексте показателен следующий иллюстративный пример (Head, 2003). Рассмотрим торговлю между Австрией и Португалией и между Австралией и Новой Зеландией. Обе пары стран характеризуются примерно одинаковыми расстояниями между столицами и произведениями ВВП. Согласно “традиционной” гравитационной модели, объемы торговли в обеих парах тоже должны быть близки друг к другу. В реальности же торговля между Австралией и Новой Зеландией превышает торговлю между Австрией и Португалией в 9(!) раз. Предложенное объяснение данного феномена состоит в том, что Австралия и Новая Зеландия удалены от других стран, что заставляет их активнее торговать друг с другом.

В соответствии с логикой вышеприведенного примера, во многих прикладных работах (см., например, Frankel, 1997; Head, Mayer, 2000) набор объясняющих переменных “традицион-

ной” спецификации гравитационной модели дополнялся двумя специальными индексами, показывающими, насколько данная страна (экспортер или импортер) отдалена от всех своих торговых партнеров. Чем значение такого индекса выше, тем больше “отдаленность”. Разными авторами были предложены разные варианты показателей отдаленности. В частности, в работе Helliwell (1997) вводится индекс вида

$$R1_i = \sum_{m, m \neq i} \frac{d_{im}}{y_m},$$

где d_{im} – расстояние между странами i и m , y_m – ВВП страны m (или ее доля в мировом ВВП)⁴.

Данный вариант индекса отдаленности неудобен, однако, тем, что расстояние до малых стран вносит больший вклад в значение $R1$, чем расстояние до крупных торговых партнеров страны i . Этого недостатка лишены две другие известные меры удаленности. В первой из них при расчете средневзвешенного расстояния между страной i и всеми ее торговыми партнерами в качестве весов берутся ВВП торговых партнеров (Wei, 1996):

$$R2_i = \sum_{m, m \neq i} y_m \cdot d_{im}.$$

Вторая мера представляет собой величину, обратную индексу “близости” страны к торговым партнерам:

$$R3_i = 1 / \sum_{m, m \neq i} \frac{y_m}{d_{im}}.$$

Легко понять, что индексы удаленности, хотя и близки по смыслу к теоретическим показателям многостороннего сопротивления экспортера и импортера Π_i и P_j , не могут служить их полноценной заменой. Во-первых, функциональный вид показателей удаленности либо вообще нельзя строго обосновать теоретически (индексы $R1$ и $R2$), либо их можно свести к Π_i и P_j только при крайне нереалистичных предположениях. Так, индекс $R3$ совпадет с показателями многостороннего сопротивления только тогда, когда цены всех товаров $p_i = 1$, двусторонние торговые издержки зависят лишь от расстояния между странами ($t_{ij} = d_{ij}$), и эластичность замещения между товарами $\sigma = 2$. Кроме того, очевидно, что в индексах удаленности не учитываются никакие другие виды торговых барьеров, кроме расстояния. Поэтому неудивительно, что работы (см., например, Anderson, van Wincoop, 2003), в которых на одних и тех же данных сопоставляются оценки традиционной гравитационной модели [1], модели с индексами отдаленности [2] и более современных методик учета теоретических показателей многостороннего сопротивления [3], дают следующие результаты. Оценки [2] занимают промежуточное положение между оценками [1] и [3], но лежат ближе к [1]. Таким образом, использование индексов удаленности при оценивании гравитационного уравнения нельзя считать адекватным решением проблемы пропущенных переменных (ненаблюдаемых показателей многостороннего сопротивления).

⁴ В некоторых исследованиях при расчете индексов удаленности добавляется также слагаемое для $m = i$. Тогда “удаленность страны от себя”, d_{ii} , обычно определяется как произведение квадратного корня площади страны на 0.4 (Head, Mayer, 2000).

3.2. Использование индексов цен официальной статистики

Еще один способ учета ценовых индексов-показателей многостороннего сопротивления - при оценивании гравитационного уравнения заключается в аппроксимации их индексами цен официальной статистики. Впервые данный подход был использован в работе Bergstrand (1985), в которой автор вывел собственный теоретический вариант гравитационного уравнения. В данной модели так же, как и в работах Anderson (1979), Anderson, van Wincoop (2003), используется предположение Армингтона. Каждая страна производит свой уникальный товар, предложение которого фиксировано. Предпочтения потребителей задаются двухуровневой функцией CES, позволяющей смоделировать разные эластичности замещения между импортными товарами (σ) и между внутренним и импортными товарами (γ). Внутренний выпуск разделяется на экспортные и внутреннюю составляющие в соответствии с функцией с постоянной эластичностью трансформации (CET⁵), также имеющей двухуровневый вид. Он определяет разные эластичности трансформации продукции между внутренним и экспортными рынками (η) и между разными зарубежными рынками (μ). При таких предположениях автор получил следующее итоговое гравитационное уравнение⁶:

$$x_{ij} = y_i^{(\sigma-1)/(\gamma+\sigma)} \cdot y_j^{(\gamma+1)/(\gamma+\sigma)} \cdot C_{ij}^{-\sigma(\gamma+1)/(\gamma+\sigma)} \cdot T_{ij}^{-\sigma(\gamma+1)/(\gamma+\sigma)} \cdot E_{ij}^{\sigma(\gamma+1)/(\gamma+\sigma)} \times$$

$$\times \left(\sum_{k=1, k \neq i}^N P_{ik}^{1+\gamma} \right)^{-(\sigma-1)(\gamma-\eta)/(1+\gamma)(\gamma+\sigma)} \cdot \left(\sum_{k=1, k \neq j}^N \bar{P}_{kj}^{1-\sigma} \right)^{(\gamma+1)(\sigma-\mu)/(1-\sigma)(\gamma+\sigma)} \times$$

$$\times \left[\left(\sum_{k=1, k \neq i}^N P_{ik}^{1+\gamma} \right)^{(1+\eta)/(1+\gamma)} + P_{ii}^{1+\eta} \right]^{-(\sigma-1)/(\gamma+\sigma)} \cdot \left[\left(\sum_{k=1, k \neq j}^N \bar{P}_{kj}^{1-\sigma} \right)^{(1-\mu)/(1-\sigma)} + P_{jj}^{1-\mu} \right]^{-(\gamma+1)/(\gamma+\sigma)}.$$

где C_{ij} - множитель издержек перевозки товара страны i в страну j ($C_{ii} = 1$), T_{ij} - тарифная ставка страны j на продукцию страны i , E_{ij} - номинальный обменный курс (количество единиц валюты страны j за единицу валюты страны i), P_{ij} - цена товара страны i в стране j и $\bar{P}_{kj} = P_{kj} \cdot T_{kj} \cdot C_{kj} / E_{kj}$.

Данное уравнение включает в себя сложные выражения большого числа цен, которые для эмпирического оценивания гравитационной модели автор аппроксимировал индексами цен официальной статистики (рассчитанных относительно базового года) для 15 стран ОЭСР. Так, в качестве про-

кси-переменной для множителя $\left(\sum_{k=1, k \neq i}^N P_{ik}^{1+\gamma} \right)^{1/(1+\gamma)}$ был использован индекс цен экспортируемых то-

варов страны i , выражение $\left(\sum_{k=1, k \neq j}^N \bar{P}_{kj}^{1-\sigma} \right)^{1/(1-\sigma)}$ аппроксимировалось индексом цен импортируемых

⁵ Constant Elasticity of Transformation. Эта функция является аналогом производственной функции CES для случая одного фактора и многомерного вектора выпуска.

⁶ Вообще говоря, это уравнение путем преобразований можно свести к виду, сходному с гравитационной моделью Андерсона и ван Винкоопа. При этом показатели многостороннего сопротивления экспортера приобретут несколько более сложную форму, чем в формулах (4) и (5) Приложения 1.

товаров страны j , а два последних множителя в правой части уравнения (8) – дефляторами ВВП стран i и j соответственно. В качестве меры транспортных издержек было взято расстояние между странами, фиктивные переменные членства в торговых союзах отвечали за тарифные барьеры. Эмпирическая лог-линейная спецификация гравитационной модели Бергстрана затем оценивалась методом наименьших квадратов на пространственных данных. Оказалось, что все переменные ценовых индексов оказывают статистически значимое влияние на международные торговые потоки. Анализ знаков коэффициентов при этих переменных позволил автору сделать следующие хорошо согласующиеся с результатами других эмпирических исследований выводы. Эластичность замещения между импортными товарами (σ) превышает единицу, эластичность замещения между внутренним и импортными товарами (ϵ) меньше единицы, а эластичность трансформации продукции между разными экспортными рынками (ρ) больше эластичности трансформации продукции между внутренним и зарубежными рынками (η).

Указанная методика оценивания гравитационного уравнения с помощью официально публикуемых ценовых индексов применялась также в работах Bergstrand (1989), Head, Mayer (2000) и Baier, Bergstrand (2001), эмпирические спецификации которых представляли собой модифицированные варианты (более детальное описание поведения потребителей, монополистическая конкуренция среди производителей) рассмотренной модели Бергстрана. Данная методология обладает, тем не менее, целым рядом существенных недостатков. Во-первых, индексы официальной статистики представляют собой достаточно грубые оценки теоретических индексов. Многие виды торговых издержек⁷ (например, “home bias” – ситуация, когда при прочих равных потребители предпочитают покупать больше внутренних товаров, чем зарубежных) не отражены в публикуемых ценовых показателях. Кроме того, эти индексы измеряются относительно базового периода, который может отличаться по странам, и тогда национальные данные будут сопоставлены некорректно. Наконец, концептуально, цены в гравитационном уравнении эндогенны, и в равновесии должны определяться одновременно с торговыми потоками. Как следствие представленной критической аргументации, методика использования публикуемых ценовых индексов при оценивании гравитационного уравнения в современных приложениях практически не применяется.

3.3. Методология Андерсона и ван Винкоопа

Помимо вывода теоретически обоснованного гравитационного уравнения международной торговли в наиболее простой и элегантной форме, Андерсон и ван Винкооп в своей знаменитой работе Anderson, van Wincoop (2003) предложили и оригинальную итеративную методику его оценивания. Авторы ограничились случаем симметричных торговых издержек $t_{ij} = t_{ji}$ (для него можно аналитически определить эффекты сравнительной статики в моделируемой экономической системе), и тогда показатели многостороннего сопротивления экспортеров и импортеров $\{P_i\}$ и $\{P_j\}$ должны быть пропорциональны друг другу: $P_i = \alpha \cdot P_j$. Посредством нормализации коэффициент

⁷ Напомним, что теоретические ценовые индексы функционально зависят от издержек торговли.

пропорциональности α между ними можно приравнять к единице (как и сделали авторы). Соответственно, теоретически обоснованное гравитационное уравнение принимает вид:

$$x_{ij} = \frac{y_i \cdot y_j}{y^T} \left(\frac{t_{ij}}{P_i \cdot P_j} \right)^{1-\sigma}, \quad (9)$$

где

$$P_j^{1-\sigma} = \sum_i P_i^{\sigma-1} \cdot \theta_i \cdot t_{ij}^{1-\sigma} \quad (10)$$

- система уравнений для определения показателей многостороннего сопротивления P_j через двусторонние торговые издержки t_{ij} , доли доходов θ_i и эластичность σ .

Далее, поскольку основной задачей эмпирической части исследования была проверка упомянутого нами ранее феномена “парадокса государственной границы” в торговле регионов США и Канады между собой (McCallum, 1995), авторы специфицировали функцию двусторонних торговых барьеров совершенно аналогично работе Маккаллума:

$$t_{ij} = b^{1-\delta_{ij}} \cdot d_{ij}^\rho, \quad (11)$$

где d_{ij} – расстояние между двумя регионами, $(b-1)$ – тарифный эквивалент торгового барьера на границе двух государств, а δ_{ij} – фиктивная переменная, равная единице, если регионы i и j находятся в одной стране, и нулю, если они расположены в разных странах. Тогда стохастическая логлинейная форма гравитационного уравнения записывается в следующем виде⁸:

$$\ln z_{ij} \equiv \ln \left(\frac{x_{ij}}{y_i \cdot y_j} \right) = k + a_1 \ln d_{ij} + a_2 (1 - \delta_{ij}) - \ln P_i^{1-\sigma} - \ln P_j^{1-\sigma} + \varepsilon_{ij}, \quad (12)$$

где $a_1 = (1 - \sigma) \cdot \rho$, $a_2 = (1 - \sigma) \cdot \ln b$, ε_{ij} - случайная ошибка и

$$P_j^{1-\sigma} = \sum_i P_i^{\sigma-1} \cdot \theta_i \cdot e^{a_1 \ln d_{ij} + a_2 (1 - \delta_{ij})}. \quad (13)$$

Решив систему нелинейных уравнений (13) для определения ненаблюдаемых ценовых индексов P_j через наблюдаемые величины в модели и параметры a_1 и a_2 , гравитационное уравнение (12) можно представить в векторном виде как

$$\ln \bar{z} = h(\bar{d}, \bar{\delta}, \bar{\theta}; k, a_1, a_2) + \bar{\varepsilon}. \quad (14)$$

Правая часть этого итогового стохастического уравнения уже представляет собой функцию только от наблюдаемых величин d , δ и θ . Уравнение (14) оценивается нелинейным методом наименьших квадратов (НМНК), который дает несмещенные состоятельные оценки параметров k , a_1 и a_2 при условии ортогональности вектора ошибок частным производным функции h по d , δ и θ .

На данных по торговле 10 провинций Канады и 30 штатов США между собой в 1993 г. авторами была получена оценка параметра a_2 , равная -1.65. Это означает, что тарифный эквивалент пограничного барьера между США и Канадой составляет 10-50% (в зависимости от выбранных значений эластичности σ), и пограничный барьер снижает объемы торговли между штатами и про-

⁸ Переменные дохода стран y здесь перенесены в левую часть уравнения вследствие допущения модели о единичной эластичности спроса по доходу.

винциями на 81%. Отметим, однако, что в этом эффекте не учитывается то, что при изменении двусторонних торговых издержек меняются и показатели многостороннего сопротивления, которые, в свою очередь, влияют на региональный экспорт. Так, при установлении пограничного барьера между двумя торговыми партнерами их показатели многостороннего сопротивления увеличатся, что положительно скажется на двусторонней торговле. Еще одним новшеством работы Андерсона и ван Винкоопа стало то, что авторы, используя оценки параметров (14), рассчитали отношение экспорта i из j в равновесиях без пограничного барьера и с ним:

$$\exp[\hat{a}_2(1 - \delta_{ij})] \cdot \left[\frac{P_i^{\sigma-1} \cdot P_j^{\sigma-1}}{\bar{P}_i^{\sigma-1} \cdot \bar{P}_j^{\sigma-1}} \right],$$

где верхняя черта указывает на значение переменной до введения барьера. Здесь первый множитель (равный 0.19 при $\delta_{ij} = 0$) отвечает за вышеупомянутый прямой эффект пограничного барьера, а второй (усредненное значение при $\delta_{ij} = 0$ равно 2.13) – за влияние границы на межрегиональную торговлю за счет изменения многостороннего сопротивления. Соответственно, совокупное уменьшение торговли между штатами и провинциями из-за установления пограничного барьера – составляет только $(1 - 0.19 \cdot 2.13) \cdot 100\% = 59\%$ ⁹, то есть всесторонний учет многостороннего сопротивления в гравитационной модели объяснил большую часть “парадокса государственной границы”.

Несмотря на соответствие теории, методология Андерсона и ван Винкоопа для оценивания гравитационного уравнения в приложениях используется редко. Во-первых, она не реализована в современных эконометрических пакетах в виде какой-либо одной команды и требует написания исследователем специального кода, объединяющего решение системы нелинейных уравнений и последующую оценку гравитационного уравнения с помощью НМНК. Другой недостаток данной методики заключается в следующем. Как показано в работе Baldwin, Taglioni, (2007, стр. 787-789), нормализация показателей многостороннего сопротивления $\Pi_i = P_j$ для случая симметричных торговых издержек справедлива только в конкретный момент времени. В последующие временные периоды коэффициент пропорциональности между Π_i и P_j будет меняться вследствие изменений двусторонних торговых издержек и ВВП торговых партнеров. Соответственно, методика Андерсона и ван Винкоопа в оригинальном виде может быть корректно применима только к пространственным, но не к панельным данным.

3.4. Методология Байера и Бергстрана

В работе Baier, Bergstrand (2009) была предложена альтернатива рассмотренной нами в предыдущем пункте методике нелинейного оценивания гравитационной модели, позволяющая значительно упростить вычислительную процедуру. А именно, основная идея авторов заключа-

⁹ В эмпирической спецификации модели, где учтены другие торговые партнеры США и Канады, этот эффект сравнительной статистики еще меньше – пограничный барьер снижает торговлю между штатами и провинциями лишь на 44%.

лась в том, чтобы лог-линейно аппроксимировать показатели многостороннего сопротивления Π_i и P_j путем их разложения в ряд Тейлора в точке x по формуле: $f(x_i) = f(x) + f'(x) \cdot (x_i - x)$. В качестве конкретной точки, в окрестности которой проводится разложение, авторы выбрали точку симметричных торговых барьеров ($t_{ij} = t$). Отметим, что рассматриваемые в модели двусторонние торговые издержки при этом не обязаны быть симметричными. После соответствующих преобразований гравитационное уравнение Андерсона и ван Винкоопа представляется в виде, где в правой части присутствуют только показатели двустороннего сопротивления:

$$\frac{x_{ij}}{y_i \cdot y_j / y^T} = \left(\frac{t_{ij}}{t_i(\theta) \cdot t_j(\theta) \cdot t^T(\theta)} \right)^{1-\sigma},$$

где $t_i(\theta) = \prod_{k=1}^N t_{ik}^{\theta_k}$, $t_j(\theta) = \prod_{k=1}^N t_{kj}^{\theta_k}$, $t^T(\theta) = \prod_{k=1}^N \prod_{m=1}^N t_{km}^{\theta_k \theta_m}$, $\theta_j \equiv y_j / y^T$.

Для проведения эконометрического анализа авторы, по аналогии с Anderson, van Vincoop (2003), специфицировали торговые издержки как логарифмически-линейную функцию $t_{ij} = D_{ij}^\rho \cdot e^{-\alpha(1-BORD_{ij})}$, где D_{ij} – расстояние между странами, $BORD_{ij}$ – фиктивная переменная наличия государственной границы между регионами i и j , α и ρ – положительные параметры. Тогда гравитационное уравнение в логарифмической форме принимает вид:

$$\ln x_{ij} = k + \ln y_i + \ln y_j - \rho \cdot (\sigma - 1) \cdot \ln D_{ij} - \alpha \cdot (\sigma - 1) \cdot BORD_{ij} + \rho \cdot (\sigma - 1) \cdot MRD_{ij} + \alpha \cdot (\sigma - 1) \cdot MRBORD_{ij} + \varepsilon_{ij}, \quad (15)$$

где переменные многостороннего сопротивления (MR) рассчитываются по формулам:

$$MRD_{ij} = \sum_{k=1}^N \theta_k \cdot \ln D_{ij} + \sum_{m=1}^N \theta_m \cdot \ln D_{mj} - \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^N \theta_k \cdot \theta_m \cdot \ln D_{km},$$

$$MRBORD_{ij} = \sum_{k=1}^N \theta_k \cdot BORD_{ij} + \sum_{m=1}^N \theta_m \cdot BORD_{mj} - \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^N \theta_k \cdot \theta_m \cdot BORD_{km}.$$

Уравнение (15) можно оценить обычным методом наименьших квадратов, наложив для соответствия теории ограничение о равенстве абсолютных величин и противоположности знаков коэффициентов при переменных $\ln D$ ($BORD$) и MRD ($MRBORD$). Авторы оценили это уравнение на тех же данных по США и Канаде, что и в работе Anderson, van Vincoop (2003), и коэффициенты при переменных торговых барьеров $\ln D$ и $BORD$ оказались сходными с оценками, полученными Андерсоном и ван Винкоопом с помощью нелинейного метода наименьших квадратов. Далее, используя методику экспериментов Монте-Карло, Байер и Бергстран установили, что результаты оценивания гравитационного уравнения двумя вышеупомянутыми методами (МНК и НМНК) статистически очень близки друг к другу.

3.5. Фиктивные переменные экспортера и импортера (пространственные данные)

Реализация методик Андерсона и ван Винкоопа и Байера и Бергстрана для учета показателей многостороннего сопротивления в теоретически обоснованной гравитационной модели так

или иначе связана с определенными сложностями технического характера. Наибольшей популярностью в приложениях пользуется гораздо более простая методика, впервые примененная в работе Harrigan (1996). Ее суть заключается в следующем. Легко видеть, что в исходной эмпирической лог-линейной модели для пространственных данных

$$\ln x_{ij} = a_0 + a_1 \cdot \ln(y_i \cdot y_j) + a_3 \cdot \ln t_{ij} + \ln \Pi_i^{1-\sigma} + \ln P_j^{1-\sigma} + \varepsilon_{ij},$$

ненаблюдаемые величины, отвечающие за многостороннее сопротивление, $\ln \Pi_i^{1-\sigma}$ и $\ln P_j^{1-\sigma}$ представляют собой индивидуальные фиксированные эффекты стран i и j . Поэтому данную модель можно переписать в виде

$$\ln x_{ij} = a_0 + a_1 \cdot \ln(y_i \cdot y_j) + a_3 \cdot \ln t_{ij} + a_i \cdot D_i + a_j \cdot D_j + \varepsilon_{ij} \quad (16)$$

где $a_i = \ln \Pi_i^{1-\sigma}$ и $a_j = \ln P_j^{1-\sigma}$ – оцениваемые параметры, D_i и D_j – фиктивные переменные экспортера и импортера¹⁰. Для пространственных данных общее число вводимых фиктивных переменных равно $2n$, где n – количество рассматриваемых субъектов торговли, а вся выборка состоит из $n(n-1)$ наблюдений. Соответственно, при достаточно большом n количество наблюдений будет значительно превосходить число введенных фиктивных переменных, и проблемы малого количества степеней свободы при МНК-оценивании модели (16) не возникает. Далее, поскольку при таком оценивании влияние переменных многостороннего сопротивления на торговлю будет учтено через a_i и a_j , оценки коэффициентов при других переменных в модели (16) будут несмещенными и состоятельными. Отметим, что эти оценки менее эффективны, чем получаемые с помощью оригинального нелинейного метода Андерсона и ван Винкоопа, поскольку в последнем используется полная информация о структуре гравитационной модели (показатели многостороннего сопротивления рассчитываются в явном виде). Этот недостаток методики введения фиктивных переменных экспортера и импортера, впрочем, компенсируется большей легкостью ее реализации.

Помимо простоты вычислительной процедуры, модель с индивидуальными эффектами экспортера и импортера обладает еще одним существенным достоинством, не имеющим прямого отношения к теории. А именно, ее использование позволяет обойти проблемы недостоверности и ошибок измерения в торговой статистике тех или иных стран. Так, например, крупный объем европейских торговых потоков проходит через порты Бельгии и Голландии. Понятно, что большая часть этих потоков носит транзитный характер, но, поскольку товары могут храниться длительное время на портовых складах, при дальнейшей перевозке часто возникают трудности с правильной идентификацией страны-производителя. Поэтому следует ожидать, что официальные данные по объемам экспорта и импорта Бельгии и Голландии будут завышены. Учесть такие особенности разных стран можно с помощью модели с фиксированными эффектами экспортера и импортера, поскольку фиктивная переменная страны отвечает за любые ее ненаблюдаемые характеристики, влияющие на заявленный объем международной торговли.

¹⁰ Если в исследовании рассматривается статистика не по совокупному объему торговли, а дезагрегированные данные по торговле разных отраслей, то в модель должны быть включены фиктивные переменные “страна-отрасль” для каждого импортера и экспортера. Это объясняется тем, что двусторонние торговые барьеры и, как следствие, показатели многостороннего сопротивления, различаются по отраслям.

4. Особенности оценивания гравитационного уравнения на панельных данных

В большинстве прикладных исследований двух последних десятилетий гравитационная модель оценивается на панельных данных, что позволяет более полно идентифицировать индивидуальные отличия между странами и парами стран, чем на пространственных данных, а также отследить динамику изменений в международной торговле.

Наиболее ранняя панельная спецификация гравитационного уравнения была предложена в работе Mátyás (1997). Она представляет собой модификацию модели с инвариантными во времени эффектами экспортера и импортера (16) с добавлением в нее фиктивных годовых переменных $Year_t$ для учета глобальных шоков (бизнес-циклы, цены на нефть и т.п.):

$$\ln x_{ijt} = a_0 + a_1 \cdot \ln(y_{it}) + a_2 \cdot \ln(y_{jt}) + a_4 \cdot \ln t_{ijt} + a_i D_i + a_j D_j + b_t \cdot Year_t + \varepsilon_{ijt}, \quad (17)$$

где индексы i и j , как и прежде, обозначают соответственно экспортера и импортера, а t – индекс времени.

Графическая иллюстрация необходимости включения в гравитационную модель фиктивных годовых переменных приведена на Рис. 1. Здесь представлен пул данных за 2 разных года ($Y1$ и $Y2$). В каждый отдельный год переменная Z (по оси абсцисс) влияет на переменную импорта $\text{Log}(Imp)$ одинаково (одинаковый угол наклона – пунктирные линии), но ненаблюдаемые глобальные шоки, влияющие на торговлю и специфичные для второго года, смещают линию зависимости вверх. Именно такие результаты будут получены при введении в регрессионное уравнение фиктивной переменной для года 2. Если же временной эффект не учитывать, то зависимость будет представлена сплошной линией. Легко видеть, что угол ее наклона существенно отличается от угла наклона пунктирных линий.

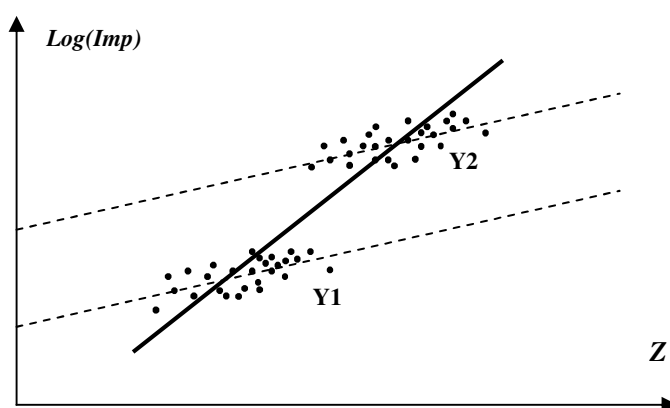


Рисунок 1. Иллюстрация необходимости введения фиктивных переменных времени на панельных данных

Использование фиктивных переменных стран (экспортера и импортера) в модели (17) устраняет смещение МНК-оценок вследствие пространственной корреляции между ненаблюдаемой

гравитационной непостоянной и независимыми переменными модели. Однако в панели показатели многостороннего сопротивления меняются от периода к периоду, и смещение оценок, возникающее из-за корреляции детерминант двусторонних торговых издержек и ненаблюдаемых показателей многостороннего сопротивления *во времени*, при этом не может быть устранено (даже если учитываются глобальные временные шоки).

Решить эту проблему можно с помощью замены в модели (17) эффектов экспортера и импортера, D_i и D_j , на меняющиеся во времени фиктивные переменные D_{it} и D_{jt} ¹¹ (Baltagi et al., 2003; Baldwin, Taglioni, 2007):

$$\ln x_{ijt} = a_0 + a_1 \cdot \ln(y_{it}) + a_2 \cdot \ln(y_{jt}) + a_4 \cdot \ln t_{ijt} + a_{it} D_{it} + a_{jt} D_{jt} + \varepsilon_{ijt}. \quad (18)$$

Введенные фиктивные переменные отвечают за любые ненаблюдаемые особенности (включая многостороннее сопротивление торговле) той или иной страны в каждый конкретный период времени. Следовательно, смещения МНК-оценок в уравнении (18) вследствие корреляции между переменными двусторонних торговых издержек и ненаблюдаемыми величинами Π_i и P_j во времени не возникает. Отметим, что общее число используемых фиктивных переменных здесь равно $2nT$, а всего наблюдений – $2n(n-1)T$ (n – количество стран, T – число периодов), и при больших N и T в модели будет достаточное число степеней свободы для ее корректного оценивания.

На панельных данных возможно также учесть влияние любых инвариантных во времени ненаблюдаемых особенностей рассматриваемых экономических единиц (в контексте гравитационного моделирования это пары стран), рассмотрев *классическую модель с фиксированными эффектами*:

$$\ln x_{ijt} = a_0 + a_1 \cdot \ln(y_{it}) + a_2 \cdot \ln(y_{jt}) + a_4 \cdot \ln t_{ijt} + b_i \cdot Year_t + \alpha_{ij} + \varepsilon_{ijt}, \quad (19)$$

где α_{ij} – индивидуальный эффект пары стран (неизвестный параметр). Эта модель может быть оценена с помощью МНК с фиктивными переменными для пар стран (Least Squares Dummy Variable Estimator, LSDV) либо с помощью внутригруппового оценивая (within estimator). Поскольку ненаблюдаемое многостороннее сопротивление торговле $\ln(\Pi_i \cdot P_j)^{1-\sigma}$ для пары стран i и j меняется во времени, оценки данной модели, аналогично случаю модели с фиктивными переменными импортера и экспортера, будут включать в себя смещение вследствие временной корреляции между $\ln(\Pi_i \cdot P_j)^{1-\sigma}$ и независимыми переменными. Тем не менее, как показывают сопоставления результатов оценивания уравнений вида (17) и (19) (Cheng, Wall, 2005; Egger, Pfaffermayr 2003), оценки классической модели с фиксированными эффектами являются более точными. Чтобы устранить оставшееся смещение в оценках модели (19), рекомендуется (Baltagi et al., 2003; Baier, Bergstrand, 2007; Baldwin, Taglioni, 2007) дополнить ее меняющимися во времени фиктивными переменными экспортера и импортера, D_{it} и D_{jt} (см. модель (18)):

$$\ln x_{ijt} = a_0 + a_1 \cdot \ln(y_{it}) + a_2 \cdot \ln(y_{jt}) + a_4 \cdot \ln t_{ijt} + a_{it} D_{it} + a_{jt} D_{jt} + \alpha_{ij} + \varepsilon_{ijt}.$$

¹¹ Годовые эффекты $Year_t$ при этом исключаются из модели, т.к. иначе система фиктивных переменных будет полностью коллинеарной.

В современных приложениях, использующих панельные данные, данная спецификация гравитационной модели является наиболее популярной.

Отметим, что классическая модель с фиксированными эффектами обладает следующей важной особенностью. А именно, эта модель не позволяет идентифицировать коэффициенты при переменных, не меняющихся во времени для каждой экономической единицы (как мы уже отмечали, в контексте гравитационного уравнения экономическая единица – это пара субъектов торговли, и к таким переменным следует отнести расстояние между субъектами, наличие общей границы, общего языка и т.п.). Формально это объясняется тем, что в оцениваемом уравнении в отклонениях от индивидуальных средних по времени (*within transformation*) один или несколько регрессоров равны нулю, и оценить полную систему нельзя. Говоря по существу, инвариантный во времени фактор здесь является частью полного индивидуального эффекта, и, соответственно, выделить влияние только этого фактора невозможно.

Идентифицировать коэффициенты при не меняющихся во времени регрессорах и одновременно учесть индивидуальные особенности экономических единиц на панельных данных можно с помощью альтернативной модели со случайными эффектами. В этой модели индивидуальный эффект α_{ij} представляет собой случайную ошибку, инвариантную по времени для каждой наблюдаемой единицы. Иными словами, индивидуальные отличия здесь носят случайный характер. Кроме того, в отличие от модели с фиксированными эффектами, в модели со случайными эффектами предполагается, что эти ошибки некоррелированы с регрессорами, т.е. индивидуальный эффект никак не связан с объясняющими переменными. При сделанных предположениях эффективные оценки коэффициентов при регрессорах можно получить, используя обобщенный метод наименьших квадратов¹². Эти оценки представляют взвешенное среднее внутригрупповых (*within*) и межгрупповых (*between*) оценок, т.е. в них учитывается не только межвременная (как в модели с фиксированными эффектами), но и пространственная вариация в данных.

Формальный выбор между моделями с фиксированными и случайными эффектами производится на основе известного теста Хаусмана, в котором проверяется гипотеза о некоррелированности индивидуальных эффектов с остальными объясняющими переменными. Отметим, тем не менее, что модель со случайными эффектами пар стран (или экспортера и импортера) в чистом виде плохо согласуется с гравитационной теорией, из которой следует, что регрессоры-детерминанты двусторонних торговых издержек должны коррелировать с ненаблюдаемыми показателями многостороннего сопротивления. Поэтому в большинстве работ, изучающих влияние на торговлю инвариантных или мало изменяющихся во времени факторов, рассматривается модифицированный вариант модели со случайными эффектами – модель Хаусмана-Тейлора (Hausman, Taylor, 1981), где допускается ненулевая корреляция между частью независимых переменных и случайными индивидуальными эффектами. Оценки модели Хаусмана-Тейлора оказываются статистически более предпочтительными, чем оценки моделей с фиксированными или случайными

¹² Если индивидуальные эффекты не коррелируют с регрессорами, то оценки с фиксированными эффектами будут, хотя и неэффективными, но несмещенными и состоятельными. В противном же случае оценки со случайными эффектами будут несостоятельными.

эффектами, в частности, в исследованиях Egger (2002), Carrare (2006), Serlenga, Shin (2007) и Fratianni, Oh (2009).

5. Некоторые типичные ошибки эмпирического гравитационного моделирования

Теоретически обоснованное гравитационное уравнение является модифицированным уравнением расходов одной страны на товары, произведенные в другой стране. Для задания таких расходов можно брать данные по импорту первой страны из второй либо данные по экспорту второй страны в первую. В эмпирической гравитационной литературе используются оба эти варианта, хотя традиционно считается (Baldwin, Taglioni, 2007), что данные по объему импорта страны более надежны, чем данные по ее экспорту, поскольку импортные потоки более строго отслеживаются таможенными органами (во избежание масштабных уклонений от уплаты импортных тарифов). В приложениях в качестве зависимой переменной гравитационной модели также часто берется не какая-либо из вышеупомянутых мер одностороннего торгового потока, а двусторонний торговый поток, т.е. усреднение экспорта (или импорта) из страны 1 в страну 2 и экспорта (или импорта) из страны 2 в страну 1. Это делается для того, чтобы улучшить качество оценок при наличии одновременно нескольких проблем с данными: недостоверности торговой статистики, предоставляемой отдельными странами, наличием выбросов (outliers) и пустых значений торговых объемов в изучаемой выборке¹³. При таком подходе важно, тем не менее учитывать, что усреднение односторонних торговых потоков при определенных условиях перестает соответствовать теории, и, как следствие, может привести к смещению оценок коэффициентов в гравитационном уравнении.

С точки зрения теории корректна следующая процедура усреднения. Умножив теоретически обоснованное гравитационное уравнение для торгового потока x_{ij} из страны i в страну j

$$x_{ij} = \frac{y_i \cdot y_j}{y^T} \left(\frac{t_{ij}}{\Pi_i \cdot P_j} \right)^{1-\sigma}$$

на аналогичное уравнение для потока x_{ji} из страны j в страну i , и, взяв геометрическое среднее¹⁴, получим:

$$\sqrt{x_{ij} \cdot x_{ji}} = \frac{y_i \cdot y_j}{y^T} \cdot \sqrt{\left(\frac{t_{ij} \cdot t_{ji}}{\Pi_i \cdot P_j \cdot \Pi_j \cdot P_i} \right)^{1-\sigma}}.$$

Соответствующая эмпирическая модель в логарифмической форме будет иметь вид:

¹³ Как мы уже видели, другой и, вообще говоря, более эффективный способ обхода указанных проблем с данными по международным торговым потокам заключается во введении фиктивных переменных для субъектов торговли.

¹⁴ Умножение (и взятие среднего геометрического), а не сложение (и взятие среднего арифметического) обеих частей двух уравнений делается потому, что во втором случае правую часть итогового уравнения упростить до вида, где оцениваемые коэффициенты будут иметь внятную экономическую интерпретацию, не удается.

$$\ln \sqrt{x_{ij} \cdot x_{ji}} = \frac{\ln x_{ij} + \ln x_{ji}}{2} = (1 - \sigma) \cdot \ln t_{ij}^{avg} + \ln(y_i \cdot y_j) + D_i + D_j,$$

где t_{ij}^{avg} - геометрическое среднее торговых барьеров t_{ij} и t_{ji} , а D_i и D_j фиктивные переменные для стран i и j соответственно. Наличие в этом уравнении усредненных барьеров торговли t_{ij}^{avg} между двумя странами означает, что усреднять переменную торговых потоков можно только тогда, когда для целей исследования не важна асимметрия торговых барьеров.

Даже с учетом этой оговорки, многие исследователи (см., например, Rose, 2000), тем не менее, вместо взятия геометрического среднего торговых потоков (т.е. полусуммы логарифмов) ошибочно берут логарифм полусуммы торговых потоков, $\ln((x_{ij} + x_{ji})/2)$. Если обозначить через δ отношение односторонних торговых потоков, $x_{ji} = \delta \cdot x_{ij}$, то неправильное усреднение дается формулой:

$$\ln((x_{ij} + x_{ji})/2) = \ln x_{ij} + \ln(1 + \delta) - \ln 2,$$

а правильное рассчитывается как:

$$\ln \sqrt{x_{ij} \cdot x_{ji}} = \frac{\ln x_{ij} + \ln x_{ji}}{2} = \ln x_{ij} + \frac{\ln \delta}{2}.$$

Таким образом, величина ошибки в зависимой переменной - разность между первым и вторым усреднениями - составит:

$$Error = \ln(1 + \delta) - \frac{\ln \delta}{2} - 2 \geq 0.$$

Легко видеть, что в случае сбалансированных односторонних торговых потоков ($\delta = 1$) ошибка будет равна нулю. Если же односторонние торговые потоки отличаются друг от друга (что наблюдается в действительности), то величина ошибки будет строго положительной. Соответственно, в эмпирических работах, использующих некорректное усреднение торговых потоков, значения зависимой переменной всегда завышены. Если ошибка измерения $Error$ зависимой переменной с положительным средним значением не коррелирует с регрессорами, то негативные последствия неправильного усреднения торговых потоков будут весьма умеренными. Наличие такой ошибки измерения, как известно, ведет к смещению оценки константы регрессии и увеличению дисперсии ошибок (несмещенность, но неэффективность оценок коэффициентов при независимых переменных). Если же ошибка измерения объемов торговли коррелирует с каким-либо регрессором, то оценка коэффициента при такой независимой переменной будет смещена вверх. Так, например, в работе Baldwin, Taglioni (2007), изучающей торговлю 23 развитых стран между собой в период с 1992 по 2002 год, показано, что страны входящие в зону евро характеризуются более сильными дисбалансами двусторонней торговли, чем другие государства в выборке. Соответственно, неправильное усреднение односторонних торговых потоков (логарифм полусуммы) дает смещенную оценку коэффициента при переменной еврозоны: он в данном случае положителен и высоко значим, в то время как при правильном усреднении (полусумма логарифмов) этот коэффициент близок к нулю и незначим.

Смещение оценок коэффициентов в гравитационных моделях может возникать не только из-за неправильного усреднения торговых потоков (ошибка измерения зависимой переменной), но и вследствие подбора слишком грубых прокси-переменных для детерминант торговых издержек или мер экономического размера экспортера и импортера (ошибка измерения независимой переменной). Покажем аналитически, к каким последствиям приводит наличие ошибок измерения в объясняющих переменных. Для простоты изложения предположим, что в истинной регрессионной модели есть только одна объясняющая переменная z_{ij}^* :

$$\ln x_{ij} = \beta \cdot z_{ij}^* + \varepsilon_{ij},$$

причем $E(z_{ij}^* \varepsilon_{ij}) = 0$. Далее будем считать, что регрессор z_{ij}^* измеряется с ошибкой, т.е. наблюдается величина $z_{ij} = z_{ij}^* + u_{ij}$, где u_{ij} - ошибка, имеющая нулевое математическое ожидание и не зависящая от ε_{ij} . Тогда реально будет осуществляться регрессия

$$\ln x_{ij} = \beta \cdot z_{ij} + (\varepsilon_{ij} - \beta \cdot u_{ij}),$$

в которой регрессор z_{ij} и ошибка $(\varepsilon_{ij} - \beta \cdot u_{ij})$ уже являются коррелированными:

$E[z_{ij} \cdot (\varepsilon_{ij} - \beta \cdot u_{ij})] = -\beta \cdot \text{Cov}(z_{ij}, u_{ij}) = -\beta \cdot V(u_{ij})$. Это означает, что МНК-оценка коэффициента β будет смещенной и несостоятельной. Поскольку

$$\hat{\beta} = \frac{\frac{1}{N} \sum_1^N (z_{ij}^* + u_{ij})(\beta z_{ij}^* + \varepsilon_{ij})}{\frac{1}{N} \sum_1^N (z_{ij}^* + u_{ij})^2}$$

то отсюда после простых преобразований (Wooldridge, 2002) следует, что

$$\text{plim} \hat{\beta} = \beta \cdot \frac{V(z_{ij}^*)}{V(z_{ij}^*) + V(u_{ij})}. \quad (20)$$

Ясно, что $|\text{plim} \hat{\beta}| < |\beta|$, т.е. оценка $\hat{\beta}$ будет смещена в сторону нуля независимо от того, положителен коэффициент β или отрицателен. Вследствие этого, такой вид смещения называется смещением с затуханием (attenuation bias).

Теперь легко понять, почему неверна практика использования *реальных* величин ВВП как мер экономического размера торговых партнеров при оценивании гравитационного уравнения, характерная для большого числа исследований (таких как Rose, 2000; Baxter, Kouparitsas, 2006). Поскольку гравитационная теория говорит о том, что эти показатели должны быть рассмотрены в *номинальном* выражении, то их коррекция на национальные дефляторы ВВП только вносит ошибку измерения в независимую переменную размера, и эта ошибка влечет за собой смещение оценок с затуханием. Этот вывод подтверждается результатами оценивания гравитационной модели для случаев номинальных (1) и реальных (2) ВВП экспортера и импортера в вышеупомянутой работе Baldwin, Taglioni (2007). В полном соответствии с формулой (20), коэффициенты при переменных размера экономик здесь оказались ближе к нулю в случае 2, чем в случае 1.

6. Проблема гетероскедастичности

В сложившейся практике эмпирического моделирования международной торговли традиционно принято оценивать логарифмически-линеаризованную, а не оригинальную мультипликативную форму гравитационного уравнения. Однако при таком подходе совершенно не учитывается тот факт, что логарифмическое преобразование переменных меняет свойства ошибок модели нетривиальным образом. При наличии гетероскедастичности (непостоянства дисперсии ошибок от одного объекта к другому) в мультипликативной форме гравитационного уравнения, это ведет к несостоятельности МНК-оценок коэффициентов лог-линейной формы. Далее в настоящем пункте мы разберем данную проблему и пути ее решения более подробно.

Рассмотрим мультипликативную стохастическую модель с постоянными эластичностями (к классу которых принадлежит и теоретически обоснованное гравитационное уравнение¹⁵) зависимости величины y от переменных x :

$$y_i = \exp(x_i \cdot \beta) \cdot \eta_i, \quad (21)$$

где $y_i > 0$, и η_i – мультипликативная ошибка с $E(\eta_i | x) = 1$. Переходя с помощью логарифмирования к линейной по параметрам форме модели, получим:

$$\ln y_i = x_i \cdot \beta + \ln \eta_i, \quad (22)$$

Если предполагается, что мультипликативная ошибка η_i не зависит от x , то и $\ln \eta_i$ не будет зависеть от объясняющих переменных, и оценивание лог-линеаризованной формы (22) методом наименьших квадратов даст состоятельные (но, в гравитационном контексте, не самые эффективные) оценки коэффициентов β ¹⁶.

При сделанных предположениях условная дисперсия величины y_i будет пропорциональна квадрату ее условного математического ожидания:

$$V(y_i | x) = [E(y_i | x)]^2 \cdot V(\eta_i | x) = \exp(2 \cdot x_i \cdot \beta) \cdot V(\eta_i).$$

На практике более логичным выглядит предположение, что условная дисперсия не растет так быстро, как квадрат математического ожидания. Это означает, что дисперсия мультипликативной ошибки $V(\eta_i)$ не является постоянной и зависит от x . Эта гипотеза подтверждается формальными тестами на гетероскедастичность ошибок в гравитационных моделях на реальных данных по международной торговле (Santos Silva, Tenreyro, 2006).

¹⁵ Действительно, теоретически обоснованную модель $x_{ij} = a_0 \cdot y_i^{a_1} \cdot y_j^{a_2} \cdot t_{ij}^{a_3} \cdot e^{b_i \cdot D_i + b_j \cdot D_j}$, где показатели многостороннего сопротивления заменены на фиктивные переменные экспортера и импортера, D_i и D_j , можно переписать как: $x_{ij} = \exp(a_0 + a_1 \cdot \ln y_i + a_2 \cdot \ln y_j + a_3 \cdot \ln t_{ij} + b_i \cdot D_i + b_j \cdot D_j)$.

¹⁶ Отметим, что ошибку в уравнении (21) можно было изначально представить и в аддитивной форме: $y_i = \exp(x_i \cdot \beta) + \varepsilon_i$, $E(\varepsilon_i | x) = 0$. С точки зрения изложения проблемы с оцениванием лог-линейного уравнения (22) это не имеет принципиального значения, поскольку переход к уравнению с мультипликативной ошибкой (21) можно осуществить путем преобразования: $\eta_i = 1 + \varepsilon_i / \exp(x_i \cdot \beta)$. Тогда условие состоятельности МНК-оценок уравнения (22) состоит в том, что $\varepsilon_i = \exp(x_i \cdot \beta) \cdot v_i$, где v_i – случайная величина, не зависящая от x . При этом η_i также не зависит от x .

Заметим далее, что математическое ожидание логарифма (как и любого нелинейного преобразования) случайной величины зависит не только от ее математического ожидания, но и моментов более высокого порядка. В частности, если η_i – логарифмически нормальная случайная величина с единичным математическим ожиданием и дисперсией σ_i^2 , то $\ln \eta_i$ будет нормальной случайной величиной с математическим ожиданием:

$$E(\ln \eta_i | x) = -\frac{1}{2} \cdot \ln(1 + \sigma_i^2).$$

Тогда понятно, что, если дисперсия ошибки из уравнения (21) зависит от x , то и $E(\ln \eta_i | x)$ будет зависеть от регрессоров, откуда следует, что оценки коэффициентов при независимых переменных в уравнении (22), полученные с помощью метода наименьших квадратов, будут несостоятельными. Величина смещения оценок при этом будет зависеть от конкретной формы гетероскедастичности и распределения объясняющих переменных.

Важно отметить, что рассмотренная проблема гетероскедастичности в гравитационной модели не решается путем оценивания логарифмической формы этой модели методом наименьших квадратов со скорректированными на наличие гетероскедастичности стандартными ошибками в форме Уайта. Полученные оценки все равно будут несостоятельными, поскольку в оцениваемом уравнении, помимо того, что дисперсия ошибок непостоянна, сами ошибки коррелируют с регрессорами.

Для корректного учета гетероскедастичности Santos Silva, Tenreiro (2006) предложили оценивать гравитационную модель непосредственно в оригинальной мультипликативной (т.е. нелинейной) форме. Как отмечают авторы работы, использовать стандартную методику оценивания нелинейных моделей – нелинейный метод наименьших квадратов (НМНК) – в данном случае нецелесообразно. Действительно, из задачи НМНК

$$\hat{\beta} = \arg \min_b \sum_{i=1}^n [y_i - \exp(x_i \cdot \beta)]^2$$

следует, что ее условия первого порядка имеют вид:

$$\sum_{i=1}^n [y_i - \exp(x_i \cdot \hat{\beta})] \cdot \exp(x_i \cdot \hat{\beta}) \cdot x_i = 0.$$

В этих условиях непропорционально большой вес придается наблюдениям с большими объемами торговли ($\exp(x_i \cdot \hat{\beta})$), которые обычно характеризуются и большей дисперсией (т.е. большей “зашумленностью”). Вследствие этого, получаемые с помощью НЛМК (состоятельные) оценки $\hat{\beta}$ могут быть чрезвычайно неэффективными.

При некоторых дополнительных предположениях о виде условной дисперсии y_i , (а именно, если предполагать, что она пропорциональна условному математическому ожиданию y_i) условия первого порядка задачи НМНК можно привести к виду, в котором все наблюдения имеют равные веса (что позволяет повысить эффективность оценок):

$$\sum_{i=1}^n [y_i - \exp(x_i \cdot \hat{\beta})] \cdot x_i = 0. \quad (23)$$

Полученные условия в точности совпадают с условиями первого порядка метода максимального правдоподобия для оценивания уравнения вида (21), где зависимая переменная y_i принимает целочисленные значения k ($k = 0, 1, 2, \dots$) и подчинена закону распределения Пуассона:

$$P\{y_i = k\} = \frac{\lambda_i^y}{y_i!} \cdot \exp(-\lambda_i),$$

$\lambda_i = \exp(x_i \cdot \beta)$, а соответствующая логарифмическая функция правдоподобия имеет вид:

$$\ln L(\beta) = \sum_{i=1}^n [y_i - \exp(x_i \cdot \hat{\beta})]. \quad (24)$$

Отметим, что из вида уравнения (23) следует, что для состоятельности оценок $\hat{\beta}$ в пуассоновской модели требуется лишь корректная спецификация условного математического ожидания:

$E(y_i | x) = \exp(x_i \cdot \beta)$. Величина y_i при этом совершенно не обязана подчиняться пуассоновскому закону распределения, и, более того, она не обязана принимать целочисленные значения. Оценки, получаемые путем максимизации функции (24) при отсутствии ограничений на вид распределения y_i называют пуассоновскими оценками *кваз*максимального правдоподобия (Poisson pseudo-maximum-likelihood, PPML). Соответственно, именно эта методика и выбирается авторами как наиболее предпочтительная для оценивания мультипликативного гравитационного уравнения. В пакете Stata она реализована с помощью команд `poisson` и `ppml`.

Используя метод экспериментов Монте-Карло для разных функциональных форм гетероскедастичности в оригинальном мультипликативном уравнении, Сантос Сильва и Тенрейро показали, что пуассоновская модель во всех рассматриваемых случаях дает несмещенные и состоятельные оценки коэффициентов при независимых переменных. Метод же наименьших квадратов, примененный к логарифмической форме оригинального уравнения, в экспериментах дает несмещенные оценки только тогда, когда дисперсия σ_i^2 ошибок η_i постоянна, т.е. имеет особый вид, требуемый для состоятельности оценок этого метода.

Помимо превосходства над МНК в условиях гетероскедастичности, пуассоновская модель обладает целым рядом других достоинств. Во-первых, она дает состоятельные оценки на панельных данных при наличии фиксированных эффектов субъектов торговли (Westerlund, Wilhelmsson, 2009), что достаточно нехарактерно для моделей, оцениваемых с помощью метода максимального правдоподобия: асимптотические характеристики многих из таких моделей при наличии фиксированных эффектов до сих пор мало изучены. В контексте гравитационного моделирования свойство состоятельности оценок пуассоновской модели представляется чрезвычайно важным, поскольку корректная эмпирическая спецификация теоретически обоснованного гравитационного уравнения, как мы уже видели выше, требует учета фиксированных эффектов страны-экспортера и страны-импортера.

Другое существенное достоинство пуассоновской модели заключается в следующем. Как мы уже ранее отмечали, многие из статистически наблюдаемых международных торговых потоков равны нулю. Понятно, что оценивание логарифмической формы гравитационного уравнения с помощью МНК не позволяет учесть эти нулевые значения, т.к. логарифм нуля не определен. Это, как правило, ведет к смещенным оценкам изучаемых параметров вследствие потери информации о причинах отсутствия торговли. В пуассоновскую же модель наблюдения с нулевой торговлей естественным образом включены, поскольку она оценивается в мультипликативной форме. Использование пуассоновской модели в гравитационном моделировании представляет собой, таким образом, один из вариантов эффективного решения проблемы нулевой торговли (более подробно она будет разобрана в следующем пункте).

Наконец, немаловажно, что коэффициенты пуассоновской модели имеют простую и понятную интерпретацию. А именно, она совершенно аналогична случаю оценивания с помощью МНК. Хотя зависимая переменная пуассоновской регрессии берется в уровнях, а не логарифмах, коэффициенты при всех логарифмированных независимых переменных следует понимать как эластичности. Коэффициенты же при переменных в уровнях интерпретируются как полуэластичности.

7. Проблема нулевых наблюдений

Как показывает статистика мировой торговли, около половины международных двусторонних совокупных торговых потоков равны нулю, и с увеличением степени товарной детализации доля нулей в общем количестве наблюдений торговли только возрастает. Традиционное МНК-оценивание лог-линейной формы гравитационной модели при этом возможно только на подвыборке ненулевых торговых потоков. Оно даст состоятельные оценки только в том случае, если “нули” возникают случайным образом (например, из-за случайных ошибок округления, случайных пропусков в данных). К сожалению, нет никаких оснований полагать, что эта гипотеза соответствует действительности. Так, ситуация появления нулей в результате ошибок округления (к примеру, со \$100 до 0) характерна для малых и удаленных торговых партнеров, т.е. вероятность таких ошибок округления будет зависеть от значений объясняющих переменных гравитационной модели. Аналогично для случая, когда нулевые наблюдения возникают вследствие ошибочной записи пропусков в данных по торговле (missing data) как нулей – он характерен для малых экономик. Соответственно, вероятность неправильной записи здесь также зависит от значений регрессоров модели. Иными словами, при МНК-оценивании гравитационной модели в лог-линейной форме теряется важная информация, содержащаяся в наблюдениях с нулевой торговлей, что, как правило, влечет за собой несостоятельность оценок коэффициентов.

Простейший способ учета нулевых наблюдений в гравитационной модели состоит в добавлении к переменной торговых потоков единицы и дальнейшем оценивании лог-линейной формы модели с помощью какой-либо рассмотренных нами ранее методик. К сожалению, серьезней-

шим недостатком данной стратегии является то, что результаты оценивания будут зависеть от выбранных единиц измерения стоимости торговых потоков. Соответственно, при этом теряется и интерпретация оцениваемых коэффициентов как эластичностей. Так, в работе Head, Mayer (2014) показано, что когда зависимая переменная берется равной $\ln(X_{ij} + 1)$, где X_{ij} – совокупный экспорт из одной страны в другую, то МНК-оценивание гравитационной модели на выборке данных по двусторонней торговле 84-х стран в 2000-м году при изменении единиц измерения стоимости от долларов до млрд. долл. США дает следующие результаты. Значимый коэффициент при логарифме расстояния меняется от -1.93 до -0.09, а переменная членства в валютных союзах (также значимая) даже меняет свой знак с отрицательного на положительный.

Поскольку значения $\ln(X_{ij} + 1)$ ограничены снизу нулем ($\ln(1) = 0$), то для учета информации о наблюдениях с нулевой торговлей в гравитационном уравнении с так модифицированной зависимой переменной возможно рассмотреть модель тобит. Ее суть, как известно, состоит в том, что для части наблюдений известно не “истинное” значение зависимой переменной, а ее усеченное значение. В данном случае тобит-модель формулируется так. Пусть ненаблюдаемая величина $\ln(X_{ij}^* + 1)$ является истинной зависимой переменной в лог-линейном гравитационном уравнении. Если $\ln(X_{ij}^* + 1) > \ln(1) = 0$ (т.е., если $X_{ij}^* > 0$), то наблюдается $\ln(X_{ij} + 1)$, где $X_{ij} = X_{ij}^*$. Если же $\ln(X_{ij}^* + 1) \leq 0$ (т.е., $X_{ij}^* \leq 0$), то наблюдаемое значение зависимой переменной равно $\ln(1) = 0$.

Данная модель оценивается методом максимального правдоподобия, в котором функция правдоподобия состоит из двух компонент: первая компонента соответствует цензурированным наблюдениям, а вторая – всем остальным. Отметим, что результаты оценивания тобит-модели так же, как и в предыдущем случае, существенно зависят от выбранных единиц измерения стоимости.

С целью устранить недостаток произвольного задания порогового значения в тобит-модели, Eaton, Tamura (1994) предложили ее новый вариант, в котором функция максимального правдоподобия модифицируется так, чтобы величина a (равная 1 в стандартной модели) в уравнении с зависимой переменной $\ln(X_{ij} + a)$ стала оцениваемым параметром. По аналогии с транспортными издержками типа айсберга, этот параметр можно интерпретировать как объем торгового потока, теряемый при перевозке. К сожалению, процедура автоматического оценивания данной модели в стандартных эконометрических пакетах никак не реализована, и исследователю необходимо писать ее код самостоятельно.

В тобит-модели Итона и Тамуры параметр a , отвечающий за установочные издержки международной торговли, одинаков для всех пар стран, что, вообще говоря, является не слишком правдоподобным предположением. Подход работы Eaton, Cortum (2001) лишен такого недостатка. Здесь предполагается, что для страны i существует минимально допустимый объем экспорта a_i , такой, что если истинный ненаблюдаемый объем экспорта $X_{ij}^* \leq a_i$, то наблюдается $X_{ij} = 0$. Если же $X_{ij}^* > a_i$, то наблюдаемая торговля $X_{ij} = X_{ij}^*$. Параметр a_i , рассчитывается как минимальный

ненулевой объем экспорта страны i по всем ее торговым партнерам, X_{ij}^{\min} , и все наблюдаемые нулевые значения экспорта X_{ij} заменяются на X_{ij}^{\min} . Затем уравнение с модифицированной зависимой переменной $\ln X_{ij}$ оценивается с помощью варианта тобит-модели с индивидуальными пороговыми значениями, задающегося командой `intreg` в пакете Stata.

В последние годы большую популярность в прикладных исследованиях приобрела альтернативная методика учета нулевых наблюдений, заключающаяся в оценивании мультипликативного гравитационного уравнения пуассоновским методом квазикасимального правдоподобия (Santos Silva, Tenreyro, 2006). Детально она была рассмотрена нами в предыдущем пункте. Добавим лишь, что проведенные авторами эксперименты Монте-Карло на сгенерированной выборке, включающей нулевые наблюдения, показали, что пуассоновская модель дает более точные оценки коэффициентов по сравнению с такими методиками учета нулевой торговли, как МНК-оценивание гравитационной модели с зависимой переменной $\ln(X_{ij} + 1)$ и тобит-модель Итона и Тамуры.

Если в пуассоновской модели не делается никаких различий между подвыборками нулевых и ненулевых наблюдений, то подход Хекмана позволяет учесть неслучайный отбор пар стран в ненулевую подвыборку. Одной из наиболее известных работ, использующих такой подход, является исследование Helpman et al. (2008). В разработанной авторами теоретической гравитационной модели главную роль в определении объемов торговли между странами играет сторона предложения: фирмы в стране i отличаются между собой по производительности и несут постоянные и переменные издержки экспорта в страну j . Соответственно, только самые производительные из этих фирм будут способны преодолеть барьер фиксированных издержек и стать экспортерами, и если в стране i нет фирм, достаточно производительных, чтобы экспортировать товары в страну j , то экспорт из i в j будет нулевым. Модель эмпирически верифицируется с помощью следующей двухшаговой процедуры типа Хекмана. Исходя из условия нулевой прибыли на экспортном рынке, на первом шаге в рамках модели бинарного выбора (уравнение отбора) рассчитывается вероятность возникновения экспорта ($T_{ij} = 1$) из страны i в страну j :

$$\rho_{ij} = P(T_{ij} = 1) = \Phi(\alpha_0 + \alpha_i + \alpha_j - \phi \cdot d_{ij} - \kappa \cdot \varphi_{ij}), \quad (25)$$

где α_i и α_j – фиксированные эффекты экспортера и импортера соответственно, d_{ij} – переменные издержки двусторонней торговли, φ_{ij} – фиксированные издержки двусторонней торговли, $\Phi(\cdot)$ – функция стандартного нормального распределения. Затем на втором шаге нелинейным методом наименьших квадратов оценивается стохастическая форма уравнения для объема экспорта из i в j (уравнение размера):

$$X_{ij} = \beta_0 + \lambda_i + \chi_j - \gamma \cdot d_{ij} + \ln\{\exp[\delta(\hat{z}_{ij} + \hat{\eta}_{ij})] - 1\} + \beta_\eta \cdot \hat{\eta}_{ij} + e_{ij}, \quad (26)$$

где λ_i и χ_j – фиксированные эффекты экспортера и импортера, $\hat{z}_{ij} = \Phi^{-1}(\hat{\rho}_{ij})$ – оцененное значение ненаблюдаемой переменной в пробит-модели, $\hat{\eta}_{ij} = \varphi(\hat{z}_{ij}) / \Phi(\hat{z}_{ij})$ – обратное отношение Миллза.

Его включение в правую часть этого уравнения (предпоследнее слагаемое) является стандартным

инструментом учета смещения вследствие самоотбора пар стран вступать в торговые отношения. Основное же отличие модели (25) – (26) от традиционной модели Хекмана заключается в наличии члена $\ln\{\cdot\}$, отвечающего за коррекцию смещения, возникающего вследствие ненаблюдаемой неоднородности фирм по производительности. Как показывает сопоставление результатов оценивания гравитационного уравнения без учета нулевых наблюдений, стандартной модели Хекмана и модели Хелпмана, Мелица и Рубинштейна на выборке по торговле 158 стран в восьмидесятые годы двадцатого века, именно учет неоднородности фирм позволяет устранить наибольшую часть смещения оценок. Важно также отметить, что для идентификации параметров уравнения отбора в моделях типа Хекмана большое значение имеет так называемое условие невключения (exclusion restriction): в наборе регрессоров уравнения отбора есть переменные, которых нет в наборе регрессоров в уравнении размера¹⁷. Подобрать такие переменные зачастую является непростой задачей. В работе Helpman et al. (2008) в качестве показателей, способных повлиять на участие в торговых отношениях, но не на объем торговли, берутся административные издержки входа фирмы на рынок страны (рассчитанные в исследовании Djankov et al., 2002) и общая религия.

Подводя итог обзору методик учета нулевых наблюдений в гравитационной модели, подчеркнем, что ни одна из них априори не является наиболее предпочтительной. Выбор конкретной методики решающим образом зависит от свойств рассматриваемых данных (гетероскедастичность-гомоскедастичность, большое-малое число нулевых наблюдений и т.п.).

8. Обзор оценок коэффициентов гравитационных моделей, полученных в разных работах

Существует несколько статей, посвященных метаанализу оценок коэффициентов при независимых переменных гравитационных моделей (см., например, Rose, Stanley, 2005; Disdier, Head, 2008; Cipollina, Salvatici, 2010). В качестве базовой работы для обзора типичных значений таких оценок нами было выбрано исследование Head, Mayer (2014), поскольку авторы собрали наиболее полную на настоящий момент базу данных результатов оценивания различных спецификаций гравитационного уравнения из статей, опубликованных в реферируемых экономических журналах. Она объединяет в себе базу данных работы Disdier, Head (2008), и результаты исследований, вышедших в период с 2006 по 2012 год. Полная выборка состоит из около 2500 спецификаций из 159 работ.

В Таблице 1 представлены суммарные статистики оценок переменных, наиболее часто используемых в гравитационных спецификациях указанной базы данных: ВВП экспортера и импортера, расстояния между странами, наличия общего языка, общей границы, колониальных связей, членства в различных торговых союзах, наличия единой валюты. В первых четырех столбцах таблицы показаны статистики по полной выборке, а в столбцах с пятого по восьмой – статистики,

¹⁷ В работе Martin, Pham (2008) с помощью экспериментов Монте-Карло сопоставляются свойства оценок разных методов оценивания гравитационного уравнения на выборке с нулевыми наблюдениями. Авторы показали, что методика Хекмана дает оценки с малым смещением только тогда, когда выполняется условие невключения.

рассчитанные на подвыборке оценок, полученных с помощью какой-либо методики состоятельного оценивания теоретически обоснованного гравитационного уравнения (методика Андерсена и ван Винкоопа, модели с фиктивными переменными, процедура Хекмана и т.п.).

Таблица 1. Статистики оценок коэффициентов при независимых переменных в гравитационном уравнении (по результатам 159 работ)

Переменная:	Все работы				Теоретически обоснованные модели			
	Медиа-на	Среднее	Ст. откл.	Число оценок	Медиа-на	Среднее	Ст. откл.	Число оценок
ВВП экспортера	0.97	0.98	0.42	700	0.86	0.74	0.45	31
ВВП импортера	0.85	0.84	0.28	671	0.67	0.58	0.41	29
Расстояние	-0.89	-0.93	0.4	1835	-1.14	-1.1	0.41	328
Общая граница	0.49	0.53	0.57	1066	0.52	0.66	0.65	266
Общий язык	0.49	0.54	0.44	680	0.33	0.39	0.29	205
Колониальные связи	0.91	0.92	0.61	147	0.84	0.75	0.49	60
ПТС (региональные, двусторонние)	0.47	0.59	0.5	257	0.28	0.36	0.42	108
Европейский союз	0.23	0.14	0.56	329	0.19	0.16	0.5	26
NAFTA	0.39	0.43	0.67	94	0.53	0.76	0.64	17
Общая валюта	0.87	0.79	0.48	104	0.98	0.86	0.39	37

Источник: Head, Mayer (2014)

Как видно из таблицы, оцененные эластичности экспорта из одной страны в другую по ВВП торговых партнеров близки к 1, как и предсказывается теорией. Так, среднее значение оценки коэффициента для ВВП экспортера (все работы) равно 0.98. Средняя эластичность торговли по ВВП импортера несколько меньше, 0.84. По мнению Feenstra et al. (2001) такая разница в оценках ВВП экспортера и ВВП импортера возникает вследствие “эффекта внутреннего рынка” (Krugman, 1980), когда производство имеет тенденцию концентрироваться в более крупных странах.

Средняя оценка эластичности экспорта по расстоянию между странами в рассматриваемой выборке работ равна -0.93, что примерно соответствует предположению одной из исходных формулировок “традиционной” гравитационной модели (коэффициент -1)¹⁸. Отметим, что оценки эластичности по расстоянию из работ, где никак не учитываются показатели многостороннего сопротивления, в среднем смещены вверх (т.е. ближе к нулю) по сравнению с оценками методик состоятельного оценивания теоретически обоснованного уравнения. Направление и величина такого смещения аналогичны результатам экспериментов Монте-Карло из той же работы Head, Mayer (2014), где сопоставлялись разные методики оценивания гравитационной модели. Двусторонние торговые издержки в этих экспериментах генерировались как функция только расстояния и членства в торговых союзах и калибровались на реальных данных по 170 странам.

¹⁸ Первая попытка обосновать это предположение теоретически была предпринята в недавней работе Chaney (2013). Из разработанной автором модели растущей сети производственно-сбытовых связей фирм следует, что в случае, когда распределение размера фирм подчиняется закону Зипфа, экспорт и расстояние между странами должны быть обратно пропорциональны друг другу.

Переходя к таким детерминантам двусторонних торговых издержек, как наличие общего языка и общей границы, из таблицы можно видеть, что в среднем они оказывают сопоставимое положительное воздействие на торговлю (значения коэффициентов: 0.53 и 0.54). По сравнению с этими оценками, средний оцененный эффект колониальных связей между двумя странами примерно в два раза больше. Как известно, колониальные связи и общий язык являются показателями исторической и культурной близости торговых партнеров. Они оказываются значимы в подавляющем большинстве оцененных спецификаций.

Наконец, переменные экономической политики, преференциальные торговые соглашения и валютные союзы характеризуются достаточно высокой степенью влияния на международную торговлю (хотя и с большим стандартным отклонением оценок). Так, для переменной преференциальных торговых соглашений среднее значение оцененного коэффициента на всей выборке работ равно 0.59 (методики оценивания теоретически обоснованной модели дают несколько меньшую цифру – 0.36). Во многих работах выборки авторы брали в качестве регрессоров переменные крупных торговых объединений, в частности, Европейского союза и НАФТА. Как видно из таблицы, независимо от того, какая модель рассматривается – традиционная или теоретически обоснованная, (средний или медианный) оцененный эффект членства в НАФТА на объемы торговли всегда превышает эффект членства в ЕС. Интересно отметить, что для вышеуказанных переменных различных торговых соглашений аналогичные метарезультаты были получены в работе Cipollina, Salvatici (2010), посвященной исключительно анализу исследований влияния ПТС на торговлю.

Что касается переменной наличия общей валюты, то ее средняя оценка в 104 спецификациях равна 0.79. Это означает, что объем торговли между странами, имеющими общую валюту, должен быть в примерно в 2 раза больше, чем между странами с разными валютами. Несмотря на то, что эта оценка существенно меньше полученной в пионерской работе Rose (2000), многие экономисты (см., например, Head, 2003) считают такой масштаб эффекта общей валюты сильно завышенным. Это мнение подтверждается результатами ряда недавних исследований, где используются методики учета возможной эндогенности переменной общей валюты. Так, в работе Frankel (2010) оценивание модели с фиктивными переменными для пар стран дало следующий результат: введение евро увеличивает торговлю между членами Еврозоны на 15%. Сантос Сильва и Тенрейро (Santos Silva, Tenreiro, 2010), оценив пуассоновскую модель, показали, что вхождение в Еврозону никак не влияет характер торговли, если принять во внимание высокую степень торговой интеграции ее членов еще до введения евро.

9. Заключение

Гравитационные модели торговли, в которых объем экспорта из одной страны в другую связан положительной зависимостью с экономическими размерами этих стран и отрицательной – с издержками торговли, успешно применяются для изучения международных торговых потоков и их детерминант. В данной работе представлен обзор методологии эконометрического оценивания

таких моделей. Проанализированы распространенные ошибки эмпирического гравитационного моделирования, связанные с атеоретичностью оцениваемой спецификации и расчета переменных. Рассмотрены альтернативные методы оценивания гравитационного уравнения, позволяющие корректно учесть обоснованные теорией показатели многостороннего сопротивления торговле (как на пространственных, так и на панельных данных), а также способы состоятельного оценивания моделей в условиях гетероскедастичности ошибок и наличия нулевых наблюдений в данных о торговых потоках. Выбор конкретной методики в том или ином приложении априори неочевиден, и во многом зависит от свойств рассматриваемых данных. На практике для проверки устойчивости полученных результатов обычно принято использовать сразу несколько методов оценивания гравитационного уравнения.

В качестве заключительного замечания отметим, что в гравитационной теории остается еще много малоисследованных тем, таких как динамические аспекты торговых отношений, учет сетевых взаимодействий экономических агентов. Их более полное изучение будет способствовать и дальнейшему совершенствованию методик эмпирического оценивания гравитационного уравнения.

Список литературы

- Anderson, J.E. (1979) "A Theoretical Foundation for the Gravity Equation", *American Economic Review*, 69(1), 106-116.
- Anderson, J.E., and E. van Wincoop (2003) "Gravity with Gravitas: A Solution to the Border Puzzle", *American Economic Review*, 63, 881-892.
- Anderson, J.E., and E. van Wincoop (2004) "Trade Costs", *Journal of Economic Literature*, 42, 691-751.
- Baier, S. L., and J. H. Bergstrand (2001) "The Growth of World Trade: Tariffs, Transport Costs, and Income Similarity", *Journal of International Economics*, 53, 1-27.
- Baier, S.L., and J.H. Bergstrand (2009) "Bonus Vetus OLS: A Simple Method for Approximating International Trade-Cost Effects using the Gravity Equation", *Journal of International Economics*, 77, 77-85.
- Baltagi, B. H., P. Egger, and M. Pfaffermayr (2003) "A Generalized Design for Bilateral Trade Flow Models", *Economics Letters*, 80, 391-397.
- Baldwin, R., and D. Taglioni (2007) "Trade Effects of the Euro: A Comparison of Estimators", *Journal of Economic Integration*, 22(4), 780-818.
- Baxter, M., and M. Kouparitsas (2006) "What Determines Bilateral Trade Flows?", NBER Working Paper № 12188.
- Bergstrand, J.H. (1985) "The Gravity Equation in International Trade: Some Microeconomic Foundations and Empirical Evidence", *Review of Economics and Statistics*, 67(3), 474-481.
- Bergstrand, J.H. (1989) "The Generalized Gravity Equation, Monopolistic Competition, and the Factor-Proportions Theory in International Trade", *Review of Economics and Statistics*, 71(1), 143-153.
- Carrare, C. (2006) "Revisiting the Effects of Regional Trade Agreements on Trade Flows with Proper Specification of the Gravity Model", *European Economic Review*, 50(2): 223-247.
- Chaney, T. (2008) "Distorted Gravity: The Intensive and Extensive Margins of International Trade", *American Economic Review*, 98(4), 1707-1721.

Chaney, T. (2013) "The Gravity Equation in International Trade: An Explanation", NBER Working Paper № 19285.

Cheng, I.-H, and H. J. Wall (2005) "Controlling for Heterogeneity in Gravity Models of Trade", Federal Reserve Bank of St. Louis Review, January/February, 49-63.

Cipollina, M., and L. Salvatici (2010) "Reciprocal Trade Agreements in Gravity Models: A Meta-Analysis", Review of International Economics 18(1), 63-80.

Deardorff, A.V. (1998) "Determinants of Bilateral Trade: Does Gravity Work in a Neoclassical World?", In: Frankel, J.A. (ed.), The Regionalization of the World Economy. Chicago: University of Chicago Press.

Disdier, A.-C., and K. Head (2008) "The Puzzling Persistence of the Distance Effect on Bilateral Trade", Review of Economics and Statistics, 90(1), 37-48.

Djankov, S., R. La Porta, F. Lopez-de-Silanes, and A. Shleifer (2002) "The Regulation of Entry," Quarterly Journal of Economics, 117, 1-37.

Eaton, J., and A. Tamura (1994) "Bilateralism and Regionalism in Japanese and U.S. Trade and Direct Foreign Investment Patterns", Journal of the Japanese and International Economies, 8(4), 478-510.

Eaton, J., and S. Kortum (2001) "Trade in Capital Goods", European Economic Review, 45(7), 1195-1235.

Eaton, J., and S. Kortum (2002) "Technology, Geography, and Trade", Econometrica, 70(5), 1741-1779.

Egger, P. (2002) "An Econometric View on the Estimation of Gravity Models and the Calculation of Trade Potentials", World Economy, 25, 297-312.

Egger, P., and M. Pfaffermayr (2003) "The Proper Panel Econometric Specification of the Gravity Equation: A Three-Way Model with Bilateral Interaction Effects", Empirical Economics, 28, 571-580.

Feenstra, R. C., J. R. Markusen, and A. K. Rose (2001) "Using the Gravity Equation to Differentiate among Alternative Theories of Trade", Canadian Journal of Economics, 34(2), 430-447.

Frankel, J. (1997) "Regional Trading Blocs in the World Economic System", Washington, DC: Institute for International Economics.

Frankel, J. (2010) “The Estimated Trade Effects of the Euro: Why Are They Below Those From Historical Monetary Unions Among Smaller Countries?” In: Alesina, A., Giavazzi, F. (Eds.), *Europe and the Euro*. University of Chicago Press, Ch. 5, 169-212.

Fratianni, M., and C. H. Oh (2009) “Expanding RTAs, Trade Flows, and the Multinational Enterprise”, *Journal of International Business Studies*, 40(7), 1206-1227.

Harrigan, J. (1996) “Openness to Trade in Manufactures in the OECD”, *Journal of International Economics*, 40(1-2), 23-39.

Hausman, J.A., and W.E. Taylor (1981) “Panel Data and Unobservable Individual Effect”, *Econometrica*, 49, 1377-1398.

Head, K., and T. Mayer (2000) “Non-Europe: the Magnitude and Causes of Market Fragmentation in the EU”, *Review of World Economics*, 136(2), 284-314.

Head, K., and T. Mayer (2014) “Gravity Equations: Toolkit, Cookbook, Workhorse”, *Handbook of International Economics*, 4, 131-195.

Helliwell, J. (1997) “National Borders, Trade, and Migration”, *Pacific Economic Review*, 3(3), 165-185.

Helpman, E., and P. Krugman (1985) “Market Structure and Foreign Trade”, Cambridge: MIT Press.

Helpman, E., M., Melitz, and Y. Rubinstein (2008) “Estimating Trade Flows: Trading Partners and Trading Volumes”, *Quarterly Journal of Economics*, 123, 441-487.

Krugman, P. (1980) “Scale Economies, Product Differentiation, and the Pattern of Trade”, *American Economic Review*, 70, 950-959.

McCallum, J. (1995) “National Borders Matter: Canada-U.S. Regional Trade Patterns”, *American Economic Review*, 85(3), 615-623.

Martin, W., and S. Pham (2008) “Estimating the Gravity Equation when Zero Trade Flows Are Frequent”, World Bank.

Mátyás, L. (1997) “Proper Econometric Specification of the Gravity Model”, *The World Economy*, 20(3), 363-368.

- Rose, A.K. (2000) "One Money, One Market: Estimating the Effect of Common Currencies on Trade", *Economic Policy*, 30, 9-45.
- Rose, A.K., and T.D. Stanley (2005) "A Meta-Analysis of the Effect of Common Currencies on International Trade", *Journal of Economic Surveys*, 19(3), 347-365.
- Santos Silva, J.M.C., and S. Tenreyro (2006) "The Log of Gravity", *Review of Economics and Statistics*, 88, 641-658.
- Serlenga, L., and Y. Shin (2007) "Gravity Models of Intra-EU Trade: Application of the CCEP-HT Estimation in Heterogeneous Panels with Unobserved Common Time-Specific Factors", *Journal of Applied Econometrics*, 22, 361-381.
- Tinbergen, J. (1962) "Shaping the World Economy: Suggestions for an International Economic Policy", Twentieth Century Fund, New York.
- Westerlund, J., and F. Wilhelmsson (2009) "Estimating the Gravity Model without Gravity using Panel Data," *Applied Economics*, 41, 1-9.
- Wooldridge, J. M. (2002) "Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data", MIT Press.

Приложение 1. Модель Андерсона и ван Винкоопа

В теоретической модели работы Anderson, van Wincoop (2003) предполагается, что мировая экономика состоит из N регионов, каждый регион производит свой уникальный товар, предложение каждого товара фиксировано. Репрезентативный потребитель страны j максимизирует функцию полезности U_j с постоянной эластичностью замещения (CES) от потребления полного товарного набора $c_{1j}, c_{2j}, \dots, c_{Nj}$ (предпочтения потребителей в разных регионах идентичны друг другу):

$$U_j = \left[\sum_i \beta_i^{1/\sigma} c_{ij}^{(\sigma-1)/\sigma} \right]^{\sigma/(\sigma-1)},$$

при заданном бюджетном ограничении

$$\sum_i p_{ij} \cdot c_{ij} = y_j,$$

где β_i – долевые параметры, σ – эластичность замещения (между любой парой потребляемых товаров), p_{ij} – цена товара региона i для потребителей региона j , y_j – совокупный доход резидентов региона j .

Цена товара i на внутреннем рынке (p_i) отличается от цен этого же товара на зарубежных рынках (p_{ij}) вследствие наличия (ненаблюдаемых) торговых издержек: $p_{ij} = p_i t_{ij}$ ($t_{ij} > 1$ – торговый барьер). Тогда стоимость экспорта из региона i в регион j рассчитывается как $x_{ij} = p_{ij} c_{ij}$, а совокупный доход региона i : $y_i = \sum_j x_{ij}$.

Условие первого порядка задачи потребителя j дает оптимальный номинальный спрос на товары:

$$x_{ij} = \left(\frac{\beta_i \cdot t_{ij} \cdot p_i}{P_j} \right)^{1-\sigma} \cdot y_j, \quad (1)$$

где P_j – индекс потребительских цен в стране j , дающийся формулой

$$P_j = \left(\sum_i (\beta_i \cdot t_{ij} \cdot p_i)^{1-\sigma} \right)^{1/(1-\sigma)}. \quad (2)$$

В общем равновесии рассматриваемой экономической системы должны выполняться условия баланса спроса и предложения на рынке каждого товара:

$$y_i = \sum_j x_{ij} = \sum_j (\beta_i \cdot t_{ij} \cdot p_i / P_j)^{1-\sigma} \cdot y_j = (\beta_i \cdot p_i)^{1-\sigma} \cdot \sum_j (t_{ij} / P_j)^{1-\sigma} \cdot y_j. \quad (3)$$

Далее, приняв обозначения: $y^T \equiv \sum_j y_j$, $\theta_j \equiv y_j / y^T$, где y^T – совокупный доход мировой экономики, θ_j – доля страны j в мировом доходе, и подставив выражение для $\{\beta_i \cdot p_i\}$ из (3) в (1), авторы

получили гравитационное уравнение следующего вида:

$$x_{ij} = \frac{y_i \cdot y_j}{y^T} \left(\frac{t_{ij}}{\Pi_i \cdot P_j} \right)^{1-\sigma},$$

где

$$\Pi_i = \left(\sum_j (t_{ij} / P_i)^{1-\sigma} \theta_j \right)^{1/(1-\sigma)}. \quad (4)$$

Подстановка выражения для $\{\beta_i \cdot p_i\}$ из (3) в (2) с учетом (4) дает:

$$P_j = \left(\sum_i (t_{ij} / \Pi_i)^{1-\sigma} \theta_i \right)^{1/(1-\sigma)}. \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) представляют собой систему для определения всех Π_i и P_j через двусторонние торговые издержки t_{ij} , доли доходов θ_i и эластичность σ .